



THE UNIVERSITY *of* EDINBURGH

## Edinburgh Research Explorer

### **Studio numerico e sperimentale dell'aerodinamica dell'imbarcazione in andatura di bolina**

**Citation for published version:**

Fossati, F, Martina, F, Muggiasca, S & Viola, IM 2008, 'Studio numerico e sperimentale dell'aerodinamica dell'imbarcazione in andatura di bolina', Paper presented at X Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, Cefalu, Italy, 8/06/08 - 11/06/08.

**Link:**

[Link to publication record in Edinburgh Research Explorer](#)

**Document Version:**

Peer reviewed version

**General rights**

Copyright for the publications made accessible via the Edinburgh Research Explorer is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

**Take down policy**

The University of Edinburgh has made every reasonable effort to ensure that Edinburgh Research Explorer content complies with UK legislation. If you believe that the public display of this file breaches copyright please contact [openaccess@ed.ac.uk](mailto:openaccess@ed.ac.uk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



# Aerodinamica di una imbarcazione in andatura di bolina: comparazione numerico-sperimentale

F. Fossati <sup>a</sup>, F. Martina <sup>b</sup>, S. Muggiasca <sup>b</sup>, I. M. Viola <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Politecnico di Milano, CIRIVE – Galleria del Vento, Milano

<sup>b</sup> Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Milano

**PAROLE CHIAVE:** Aerodinamica della vela, piani velici, andature di bolina, RANS, confronto sperimentale, galleria del vento.

## ABSTRACT

### 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, nell'ambito delle regate di alto livello agonistico, lo studio dell'aerodinamica delle vele con codici RANS è divenuto un consueto strumento progettuale. In particolare, nelle andature di bolina le vele si comportano come due profili alari con flusso prevalentemente attaccato. Per questo motivo sono in maggior parte utilizzati codici a pannelli che riescono a calcolare con sufficiente accuratezza le distribuzioni di pressione sulle vele e quindi le forze sviluppate. Tuttavia, l'interesse nei codici RANS risiede nella loro possibilità di indagare tutto il campo di moto in una vasta regione anche non nelle immediate vicinanze delle vele, divenendo un potentissimo strumento di comprensione del fenomeno fisico.

Nel presente lavoro viene presentata l'attività di ricerca svolta sul piano velico di un'imbarcazione da crociera-regata di 48'. In particolare sono state svolte alcune prove sperimentali mediante prove in galleria del vento del modello in scala 1:10 dell'imbarcazione allo scopo di studiare il comportamento aerodinamico del piano velico in andatura di bolina indagando l'effetto delle regolazioni delle vele.

Le prove sperimentali sono state quindi riprodotte numericamente effettuando una serie di analisi RANS e confrontando il risultato numerico con le misure sperimentali. Allo scopo di poter disporre nel modello di calcolo della geometria delle vele tenendo conto dell'effetto delle regolazioni impartite durante le prove sperimentali, parallelamente all'acquisizione delle forze prodotte dalle vele sull'imbarcazione è stata rilevata la forma assunta dalle vele mediante l'analisi fotogrammetrica delle immagini registrate da un sistema di telecamere ad infrarossi.

Nel seguito, dopo una breve descrizione delle modalità di prova in galleria del vento e del sistema di rilievo della geometria del piano velico, verranno descritte le modalità seguite per la generazione del modello numerico di simulazione della prova sperimentale, con particolare riferimento alla definizione del dominio di calcolo, alla generazione della mesh ed alla sua topologia. Viene dapprima analizzata l'influenza della mesh sul risultato numerico e successivamente vengono presentati i risultati ottenuti dalla simulazione numerica delle diverse regolazioni del piano velico ed il confronto con il dato sperimentale.

### 2. DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

Un modello completo dell'imbarcazione (la parte al di sopra del piano di galleggiamento), completo di coperta, albero, sartame e vele, viene montato su una bilancia dinamometrica a 6 componenti, a sua volta fissata al centro del tavolo girevole nella camera di prova a strato limite. La bilancia è posizionata nel modello in modo tale da avere l'asse X allineato con l'asse longitudinale del modello e l'asse Z verticale verso l'alto. Il modello può essere fissato con un angolo di sbandamento a scelta. Se le dimensioni della sezione della camera di prova consentono l'utilizzo di modelli di grandi dimensioni, ciò permette di realizzare le vele con le usuali tecniche di veleria, di utilizzare la componentistica tipica del modellismo per il sartame, verricelli, scotte, etc. Tutto il piano di coperta può essere riprodotto in scala consentendo di regolare le vele attraverso i medesimi circuiti con cui vengono regolate al vero. In tal modo è possibile avere, ad esempio, arridatoi per regolare il sartame, i circuiti delle drizze, cunningam, vang, base randa, carica alto e basso, etc, tutti regolabili. I modelli vengono approntati utilizzando fino a 7 verricelli elettrici che, comandati in remoto dalla camera di controllo, servono a regolare le manovre correnti più importanti quali scotte, carrelli, tangone, etc. I verricelli sono proporzionali in modo tale da consentire la registrazione della regolazione e permettere la ripetibilità della misura. Inoltre, anziché essere manovrati da una consolle in camera di controllo, è possibile anche manovrarli con un normale radiocomando da modellismo mentre si è dentro la camera di prova. In figura 1 e 2 è mostrato un tipico modello di imbarcazione a vela nella camera di prova della Galleria del vento del Politecnico di Milano.

Figura 1: modello di imbarcazione in andatura di bolina durante una sessione di prova nella Galleria del Vento del Politecnico di Milano.

Durante la prova la velocità del flusso viene mantenuta costante. In particolare, nelle andature di bolina si preferisce raggiungere la massima velocità del flusso sopportabile dal modello, mentre provando vele per andature portanti si preferisce riprodurre al meglio il rapporto tra le forze peso e le forze aerodinamiche "di galleggiamento" che agiscono sulla vela per consentirne la corretta regolazione. La rotazione del tavolo girevole definisce l'angolo al vento apparente e il modello viene fissato alla bilancia con un predeterminato angolo di sbandamento. Fissate queste condizioni di prova, vengono testate diverse regolazioni delle vele operando in remoto sui verricelli elettrici. Dalla camera di controllo, è possibile vedere chiaramente il modello e, ad esempio, i filetti di lana sulle vele. Inoltre diverse telecamere sono poste intorno e sul modello in modo da poter regolare le vele dai migliori punti di osservazione e anche da quelli da cui normalmente si opera da bordo. Per ogni regolazione delle vele, vengono acquisiti i segnali della bilancia e tutte le grandezze di controllo della vena per un periodo ed una frequenza a scelta, in genere 30 secondi di campionamento a 100 Hz.

Per confrontare diversi piani velici (con differenti regolazioni delle vele in varie condizioni di prova), normalmente si preferisce utilizzare coefficienti adimensionali, dividendo le forze misurate

per una pressione dinamica di riferimento. In questo modo è possibile confrontare l'efficienza di vele che hanno diverse superfici e che sono state provate con diversi valori di pressione dinamica. Il primo confronto che è possibile effettuare, valuta la variazione del coefficiente di spinta all'avanzamento ( $C_x$ ) rispetto al coefficiente di forza laterale ( $C_y$ ). A titolo di esempio, in figura 2a si mostra l'andamento di  $C_x$  rispetto a  $C_y$  per 4 angoli al vento apparente (AWA) provati: 22°, 27°, 32° e 42°. Per ogni AWA si cercano le regolazioni delle vele che danno il massimo  $C_x$  per diversi valori di  $C_y$ . La prima regolazione delle vele che l'operatore ricerca è quella che massimizza  $C_x$  indipendentemente dal valore di  $C_y$ . In generale, tesando le scotte delle vele si ottiene un incremento di  $C_x$  e di  $C_y$ . Tuttavia, tesando le scotte eccessivamente si producono ampie zone di flusso separato con conseguente crollo di  $C_x$  a fronte di un incremento di  $C_y$ . Dopo aver trovato la regolazione con il massimo  $C_x$  assoluto, si comincia a lasciare il carrello della scotta della randa per ridurre l'angolo di attacco della vela e trovare i massimi  $C_x$  corrispondenti a  $C_y$  via via decrescenti. Una volta lasciato completamente il carrello si lascia anche la scotta della randa per aumentare il twist della vela.

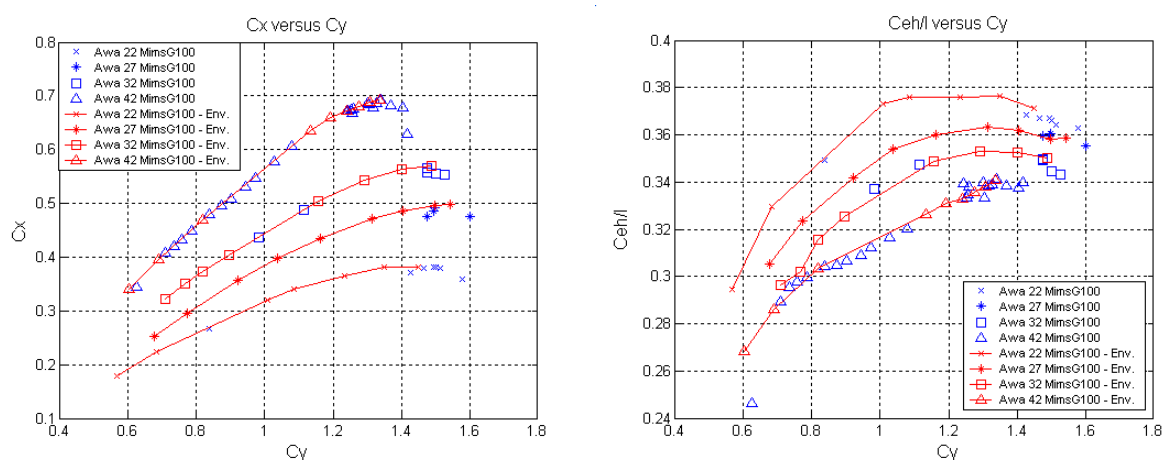


Figura 2. Andamento del coefficiente di spinta all'avanzamento ( $C_x$ ) e dell'altezza del centro velico in funzione del coefficiente di forza laterale ( $C_y$ ) per diverse regolazioni delle vele. Le quattro curve sono riferite rispettivamente ad angoli al vento apparente (AWA) di 22°, 27°, 32° e 42°.

Misurando il momento sbandante e dividendolo per la forza laterale, è possibile determinare l'altezza del centro di spinta ( $C_{eh}$ ) (fig. 2b).

### 3. DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI RILEVO DELLA FLYING SHAPE DELLE VELE

Durante le prove sull'attrezzatura velica in Galleria del Vento, alle classiche misure di forza e coppia, come detto in precedenza, è stato recentemente affiancato un nuovo sistema proprietario sviluppato allo scopo di effettuare il rilievo della forma delle vele in condizioni di esercizio.

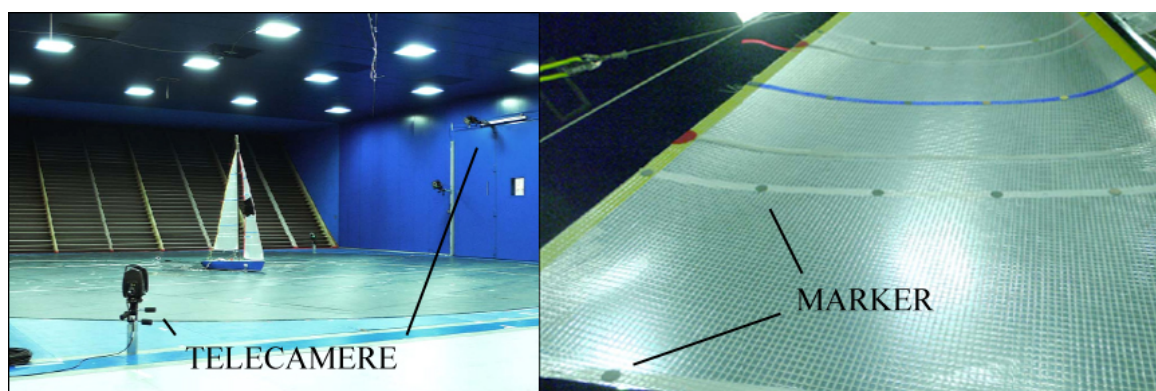


Fig. 3: telecamere in camera di prove, marker circolari piatti sulla vela

Il sistema suddetto determina le coordinate spazio temporali di una griglia di punti di interesse (denominati marker) applicati sulle vele e sull'attrezzatura (fig. 3), riprendendo simultaneamente il modello con più telecamere, ed elaborando successivamente i filmati acquisiti. Il sistema di misura stereoscopico si compone dei seguenti elementi:

n.8 telecamere con tecnologia GigaEthernet, sensore CCD da 1/2" pollice, risoluzione di 1392x1040 pixels<sup>2</sup> e massima frequenza di acquisizione pari a 17 fps.

n.8 ottiche zoom 8-48 mm munite di blocchi meccanici, che impediscono la variazione accidentale dei valori di fuoco e di lunghezza focale.

n.8 illuminatori impulsati, montati coassialmente alle ottiche, ciascuno costituito da una corona circolare di LED ad alta luminosità, la quale lampeggia con frequenza pari alla frequenza di campionamento utilizzata dalle telecamere;

un PC calibrato per la specifica applicazione che acquisisce su hard disk i filmati acquisiti, sul quale sono inoltre installate due schede di acquisizione dati ed una scheda dedicata alla generazione del segnale di trigger frame-by-frame;

un software di acquisizione custom-made compilato in ambiente Visual Studio, che gestisce la fase di acquisizione e garantisce la sincronizzazione delle diverse telecamere;

un software proprietario di elaborazione dati che permette di estrarre in tempo reale, ed in alcune sezioni di interesse alcune informazioni sintetiche della "flying shape" delle vele quali la massima freccia e la sua posizione lungo la corda, nonché l'angolo di svergolamento o "twist" della medesima sezione della vela;

un software proprietario che elabora fuori linea i filmati registrati e genera le superfici che interpolano la griglia di punti ripresi.

Il software di acquisizione delle immagini che risiede su un PC dedicato riceve il segnale di start dal sistema di acquisizione dati di Galleria sottoforma di segnale trigger, ed a sua volta invia a tutte le telecamere un trigger per ogni singolo fotogramma per mezzo di una scheda dedicata a tale scopo. Verso il PC di acquisizione convergono poi i filmati acquisiti, dati dall'unione di una sequenza ordinata di immagini. Ciascuna telecamera registra la radiazione emessa dall'illuminatore e riflessa dalla superficie del marker. Quanto rilevato viene inviato ad un PC, sul quale risiede il software di acquisizione che estrae le coordinate 2D dei centri dei marker in ciascun fotogramma e salva queste informazioni in un file di testo.

Prima di ogni campagna di misure è necessario effettuare una calibrazione del sistema; tale operazione consiste nella ripresa simultanea da parte di tutte le telecamere di una griglia di marker posti in posizioni note. A seguito della calibrazione il sistema determina la posizione delle telecamere rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano ed una serie di parametri ottici delle telecamere, dopodichè trasmette queste informazioni al software di elaborazione, che dopo aver corretto tutti i fotogrammi dalle alterazioni prospettiche e dalle distorsioni ottiche, proietta nello spazio 3D i centri dei *marker* ricavando la loro posizione nello spazio. In un secondo momento e fuori linea la nuvola di punti corrispondente i markers di ciascuna vela viene interpolata con due superfici di tipo NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) ottenute minimizzando la distanza che intercorre fra un insieme di punti sulle curve e le loro proiezioni sulle superfici [9] ottenendo il modello geometrico del piano velico che può essere utilizzato come input per le analisi fluidodinamiche numeriche (fig. 4).

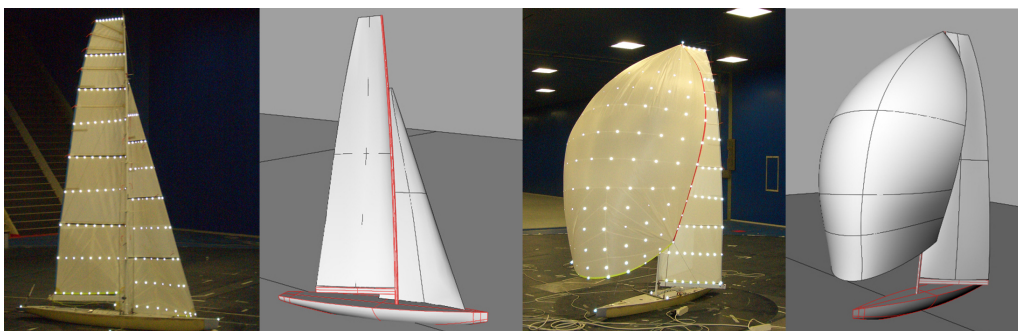


Fig. 4: piano velici strumentati con i marker e relativi modelli geometrici ottenuti per interpolazione delle coordinate spaziali dei marker

## 2. IL PIANO VELICO ANALIZZATO

Il piano velico analizzato è una tipica configurazione per andature di bolina. Si tratta di un modello in scala 1:10 di un'imbarcazione IMS di 48' armato a sloop con randa e genoa. In particolare la randa è dotata del massimo allungamento consentito dall'attuale regolamento IMS ed il genoa è armato in testa d'albero senza sovrapposizione (fig. 5).



Figura 5. Il modello di imbarcazione all'interno della camera di prova.

La Tabella 1 mostra le principali dimensioni del piano velico.

I	1970 [mm]
J	600 [mm]
P	1760 [mm]
E	568 [mm]

Tabella 1: principali dimensioni del piano velico

## 5. DESCRIZIONE DELLE ANALISI NUMERICHE

Le simulazioni numeriche hanno modellato la prova sperimentale realizzata in scala modello, in modo tale che fosse possibile confrontare le forze calcolate con quelle misurate sperimentalmente senza fattore di scala. La velocità del flusso adottata durante il test in galleria del vento è circa 3m/s, pertanto il Reynolds caratteristico calcolato sull'altezza del modello di 2.117m è dell'ordine di  $4 \cdot 10^5$ . Poiché non è possibile allo stato dell'arte risolvere il sistema di equazioni di Navier-Stokes per Reynolds così alti, è stata adottata una tecnica RANS che consentisse di risolvere il sistema mediato nel tempo. Per tenere conto dell'effetto sul moto medio delle componenti fluttuanti tagliate dall'operatore di media, è stato applicato un modello di turbolenza SST, così come suggerito in Collie et al., 2001. I relativamente modesti numeri di Mach, consentono di trascurare le variazioni di densità dell'aria e quindi di disaccoppiare l'equazione dell'energia dall'equazione di continuità e di momento di quantità di moto.

Le analisi numeriche sono state realizzate con il solver commerciale Fluent (Ansys Inc.), sia nella versione seriale che parallelo a seconda delle dimensioni di mesh utilizzate. Infatti sono state investigate diverse dimensioni e topologie di mesh, per controllare l'effetto della discretizzazione spaziale sulla soluzione. Per la realizzazione delle mesh sono stati utilizzati i pre-processor Gambit e Tgrid (Ansys Inc.) con approccio *bottom-up*. Il dominio è stato discretizzato con elementi tetraedrici di dimensione crescente dalle pareti solide (vele e scafo), al contorno esterno del dominio. Sono stati provati diversi valori del rapporto di disinfittimento, ovvero il rapporto tra la dimensione lineare di un elemento e del successivo in direzione normale al corpo solido. Come mostrato in Viola, 2008, rapporti elevati consentono una diminuzione del numero di elementi della mesh ma possono influire sulla soluzione, pertanto sono stati adottati rapporti modesti da 1.1 a 1.2. Per avere una dimensione di griglia più raffinata nella regione di parete, sono stati utilizzati elementi esaedrici allungati nelle direzioni tangenti alla superficie (*span-wise* e *cord-wise*). E' stato mostrato che l'estensione della regione esaedrica influisce in modo determinante sul campo di moto, pertanto questa è stata fissata in accordo con i criteri descritti in Viola, 2008. In figura 6a (sinistra) si mostra una sezione orizzontale della mesh tetraedrica in cui è visibile il disinfittimento dalle vele alle estremità del dominio, in figura 6b (destra) si mostra il dettaglio del bordo di uscita della randa ed è visibile la regione di elementi esaedrici intorno alle vele.



Figura 6: esempio di mesh con elementi tetraedrici ed elementi esaedrici vicino alle pareti solide.

Sono state realizzate diverse simulazioni per verificare che la condizione di velocità in ingresso fosse posta sufficientemente a monte del modello da non influire sulle forze aerodinamiche. La dimensione trasversale della camera di prova è stata modellata diminuendo la distanza tra le pareti e imponendo su di esse una condizione di *free-slip*, in tal modo è stato possibile non risolvere lo strato limite sulle pareti della galleria mantenendo lo stesso effetto di bloccaggio. Per contro, il profilo di velocità sul pavimento della galleria è stato trascurato.



In seguito, sono presentati i risultati delle simulazioni realizzate con una mesh di circa 1.5 milioni di soli elementi tetraedrici e  $y^+$  superiori a 60, e una mesh di circa 2 milioni di elementi di cui parte esaedrici nelle regioni a parete e  $y^+$  inferiore a 5. Come mostrato in Viola, 2008, mesh più rade (*coarse*) tendono a posticipare la separazione mentre mesh più fini (*fine*) ad anticiparla. Tuttavia entrambe le mesh sono in grado di appezzare i trend in termini di forze precedentemente osservate sperimentalmente per diverse regolazioni delle vele.

Di seguito sono riportati i risultati numerici e il confronto con i dati sperimentali per cinque regolazioni delle vele, realizzate rispettivamente partendo dalla regolazione di massima spinta e lasciando prima il carrello della randa poi la scotta come sopra descritto. L'asse longitudinale  $x$  del modello è posto a un angolo fisso di  $22^\circ$  rispetto all'asse longitudinale della galleria, pertanto questo individua l'angolo al vento apparente nominale della prova. Perpendicolarmente ad esso sul piano orizzontale è definito l'asse  $y$ . Nelle figure che seguono il coefficiente globale di resistenza (*drag*) è misurato lungo l'asse del vento, mentre perpendicolarmente a questo è misurato il coefficiente di portanza (*lift*). Il modello è in posizione verticale, ovvero in assenza di angolo di sbandamento.

In figura 7 sono presentati sul piano CD-CL, la curva di inviluppo misurata sperimentalmente descritta dalle 5 regolazioni denominate rispettivamente 10, 12, 13, 17 e 21. Inoltre è presentata una curva descritta da 4 delle precedenti regolazioni calcolate con mesh rada e una curva descritta da altre 4 regolazioni calcolate con mesh fitta. Si osserva che il trend sperimentale è correttamente colto da entrambe le simulazioni, tuttavia mentre le simulazioni con mesh rada mostrano una sovrastima sistematica del lift e una corretta valutazione del drag, le mesh fini con regione esaedrica mostrano una sovrastima del drag, dovuto a una sistematica sovrastima dell'estensione della regione di flusso separato.

In figura 8 sono presentate le medesime curve nel piano delle componenti di avanzamento CX e laterale CY. Si osserva che la maggiore estensione della regione separata nelle regolazioni denominate 10 e 12 in particolare, comporta una brusca diminuzione della componente di avanzamento.

In figura 9 si mostra l'altezza del centro di spinta CEH calcolato per le 4 regolazioni, misurato verticalmente dal piano di galleggiamento e adimensionalizzato sull'altezza del modello  $h$ . L'altezza del centro di spinta rimane pressoché invariata per le prime 4 regolazioni realizzate lasciando il carrello della randa e diminuisce con l'ultima regolazione quando viene lasciata la scotta.

Per brevità di trattazione, in seguito è analizzato il campo di moto e pressione corrispondente a 3 delle 4 regolazioni, precisamente alle regolazioni denominate 10, 13 e 21, calcolati con mesh rada.



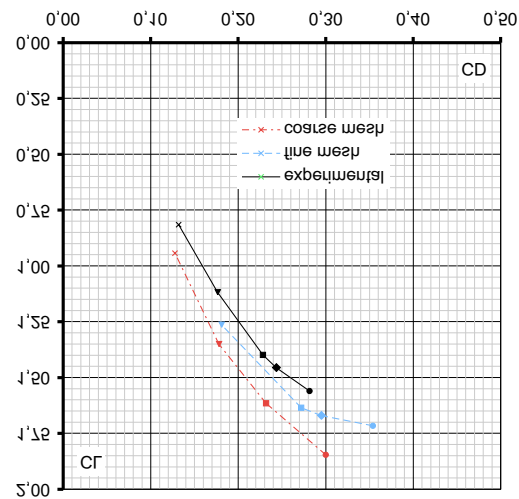


Figura 7: coefficienti CL - CD sperimentali e numerici delle regolazioni denominate 10, 12, 13, 17 e 21, rispettivamente indicati con cerchio, rombo, quadrato, triangolo, e x. La curva nera mostra i risultati sperimentali; in rosso i risultati ottenuti con mesh rada e in azzurro con mesh fina.

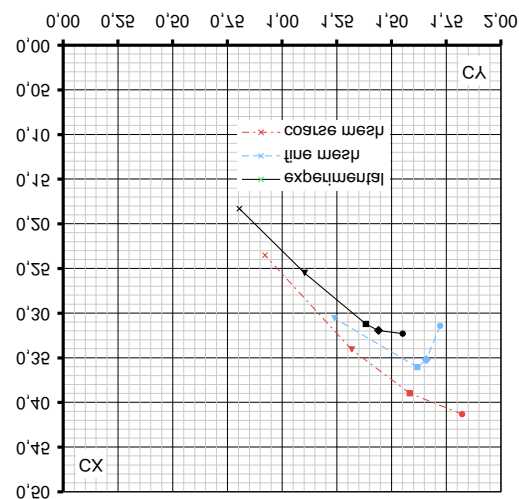


Figura 8: coefficienti CX - CY sperimentali e numerici delle regolazioni 10, 12, 13, 17 e 21, rispettivamente indicati con cerchio, rombo, quadrato, triangolo, e x. La curva nera mostra i risultati sperimentali; in rosso i risultati ottenuti con mesh rada e in azzurro con mesh fina.

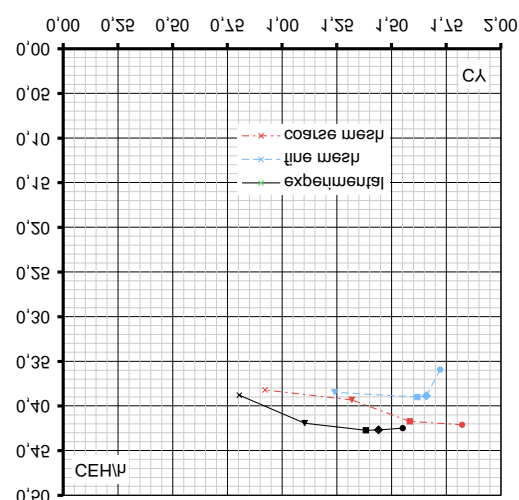


Figura 9: coefficienti  $CEH/h - CY$  sperimentali e numerici delle regolazioni 10, 12, 13, 17 e 21, rispettivamente indicati con cerchio, rombo, quadrato, triangolo, e x. La curva nera mostra i risultati sperimentali; in rosso i risultati ottenuti con mesh rada e in azzurro con mesh fina.

In figura 10 sono presentate le distribuzioni del coefficiente di pressione  $C_p$  sulle vele e sullo scafo, osservati da sottovento, per le tre regolazioni. Sopravento la distribuzione di pressione è prevalentemente omogenea con valori di  $C_p$  compresi tra 0.5 e 1; mentre alla depressione sottovento alle vele è dovuta la maggior parte della forza aerodinamica.

La regolazione del fiocco rimane invariata e prima viene lasciato il carrello della randa (regolazione 13), e successivamente la scotta della randa (regolazione 21); è interessante osservare come entrambe queste manovre sulla randa incidano prevalentemente sulla distribuzione di pressione del fiocco. Infatti il contributo alla risultante aerodinamica dovuta alla randa è inferiore a quella dovuta al fiocco. Come noto nella letteratura aeronautica, essendo randa e fiocco due profili accoppiati, il secondo profilo genera upwash sul primo inducendo un incremento dell'angolo di attacco. Viceversa il primo profilo genera downwash sul secondo diminuendone, anche se in misura ridotta, l'angolo di attacco. Per questo motivo, lasciando la randa si osserva una diminuzione della depressione sottovento ad essa e una conseguente diminuzione del lift generato, quindi un minor upwash sul fiocco con conseguente diminuzione della depressione sottovento ad esso (regione più scura in figura). Le curve di isopressione mostrano che il minimo di pressione è sia per la randa sia per il fiocco, collocato nella metà più alta della vela. Infine, si osservi che le isobare sullo scafo mostrano una continuità del campo di pressione tra fiocco e scafo.

In figura 11 è presentato il campo di moto su un piano orizzontale a  $1/3$  dell'altezza del modello per le tre regolazioni. Si osserva chiaramente la rotazione della sezione della randa che ne mostra la differente regolazione. Le regioni di forti depressioni sottovento alle vele corrispondono alle regioni di flusso accelerato (regioni più chiare in figura). Osservando il canale tra randa e fiocco, si osserva che nella prima regolazione, l'isobara corrispondente a  $C_p=0$  congiunge il bordo di uscita del fiocco con il bordi di ingresso della randa. Nelle regolazioni successive, lasciando la randa e chiudendo di conseguenza il canale, l'isobara si distacca dal bordo di uscita del fiocco e si sposta sottovento alla randa sempre più distante dal bordo di ingresso. Il punto di ristagno rimane per entrambi i profili sul bordi di ingresso.

Lo spostarsi dell'isobara  $C_p=0$  sottovento alla randa lasciando la randa, è messo in particolare luce dalla figura 12 dove i diagrammi di  $C_p$  in funzione della corda di ogni profilo sono mostrati per le tre regolazioni. Dal primo diagramma che presenta la regolazione con la randa più cazzata, si evince che la pressione generata dal fiocco è molto più rilevante di quella generata dalla randa. Infatti, la superficie racchiusa dalla curva blu del fiocco è molto più grande della superficie racchiusa dalla curva rossa della randa. La distribuzione di pressione sul fiocco ha un picco di depressione significativo al 10% della corda, il quale genera una forza orientata verso la direzione di avanzamento grazie alla sua sezione visibile in figura 11 che presenta una discreta profondità (camber) al bordo di ingresso e massimo camber al 35%. Al contrario, la sezione della rada presenta il massimo camber più indietro, al 50%, in modo da avere meno camber avanti e lasciare geometricamente più aperto il canale tra randa e fiocco. Il picco di depressione della randa quindi si colloca più indietro rispetto al fiocco, oltre il 20%. Sempre in figura 11, i diagrammi corrispondenti alle regolazioni successive mostrano uno schiacciamento uniforme del profilo di pressione del fiocco, mentre il profilo di pressione della randa si inverte nel primo 15% della corda. Lo zero della curva  $C_p$  di sottovento della rada si sposta dal bordi in ingresso al 12% della corda, così come precedentemente mostrato dall'isobara  $C_p=0$  in figura 10. Infatti, lasciando la randa si ha una diminuzione della sezione del canale tra randa e fiocco che comporta un aumento di perdita di carico del canale. Di conseguenza la portata di flusso che passa nel canale diminuisce, diminuendo la velocità e aumentando la pressione.

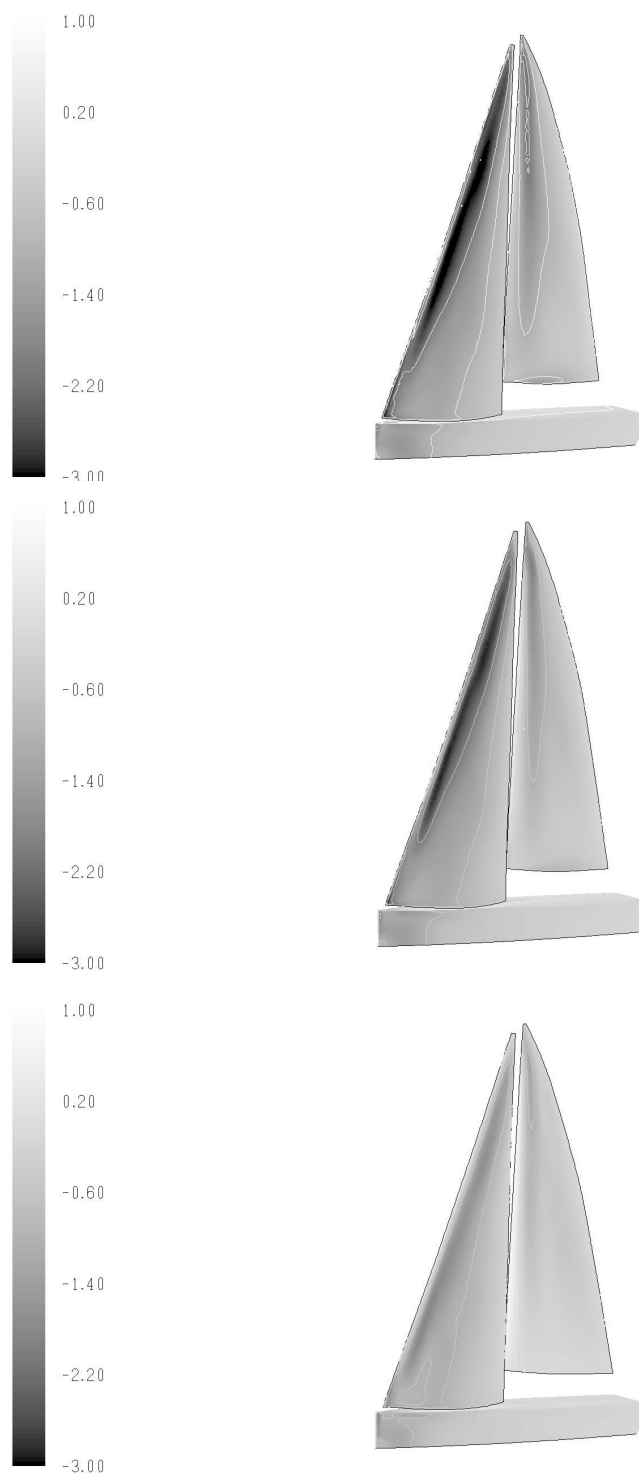


Figura 10: distribuzioni del coefficiente di pressione  $C_p$  sull'imbarcazione vista da sottovento delle simulazioni delle regolazioni 10, 13 e 21 rispettivamente dall'alto verso il basso. Il colore più scuro indica regioni in depressione mentre il colore più chiaro indica regioni in pressione. Sono indicate in bianco le curve isobare per valori di  $C_p=0$ , -1 e -2.

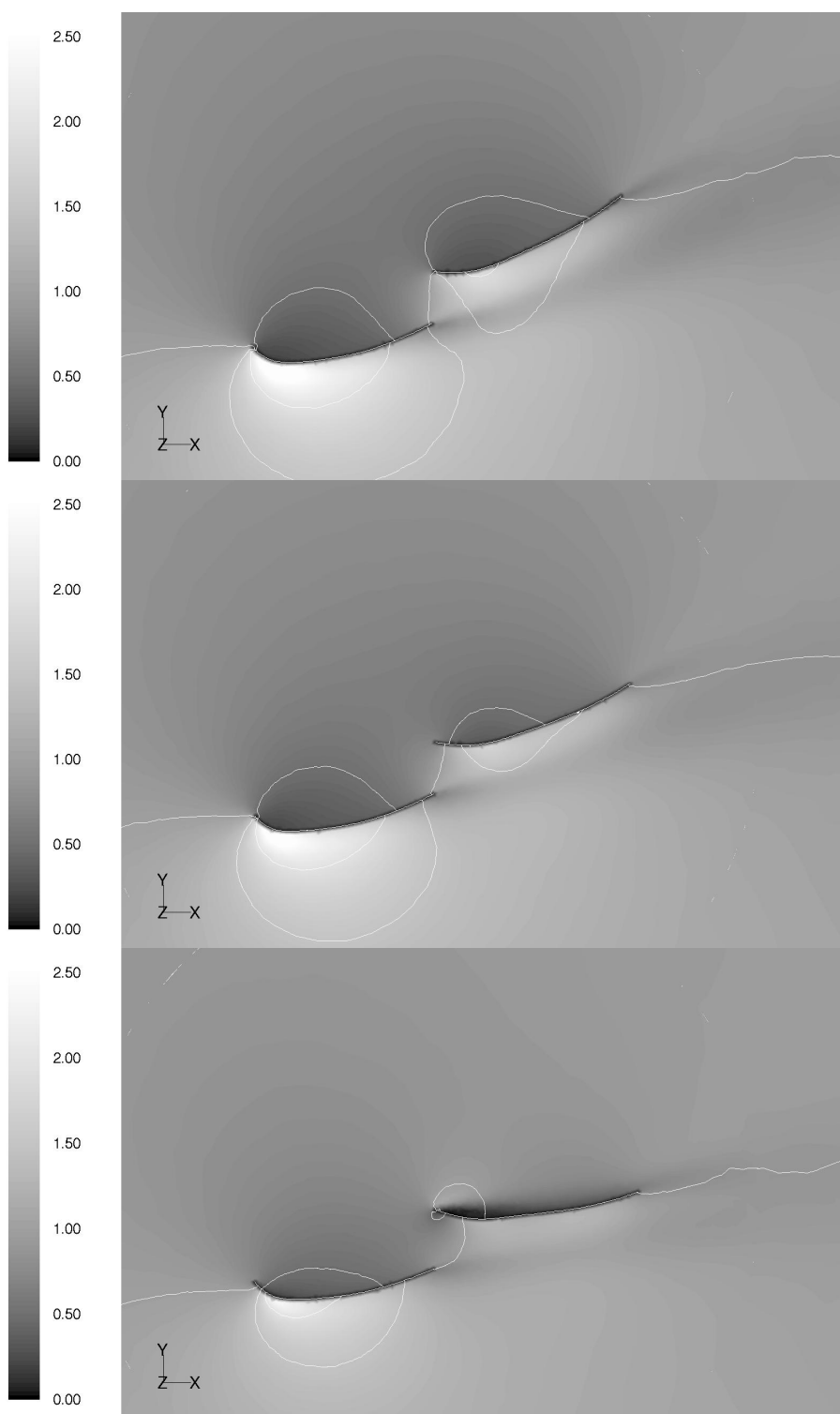


Figura 11: distribuzioni della pressione dinamica adimensionale  $q^*$  sul piano orizzontale  $z=1/3h$ , delle simulazioni delle regolazioni 10, 13 e 21 rispettivamente dall'alto verso il basso. Il colore più scuro indica regioni decelerate mentre il colore più chiaro indica regioni accelerate. Sono indicate in bianco le curve isobare per valori di  $C_p=+0.5, 0, -0.5$  e  $-1$ .

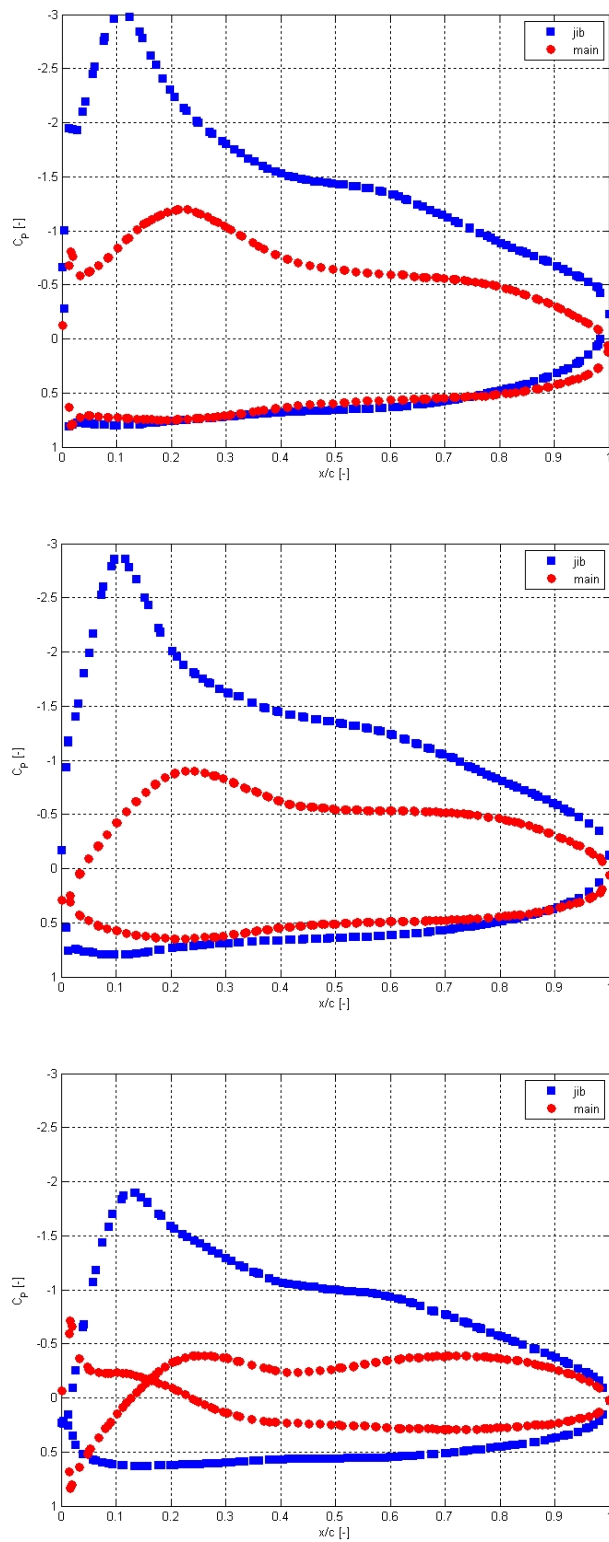


Figura 12: andamento del coefficiente di pressione  $C_p$  lungo la corda normalizzata  $x/c$  a quota  $z=1/3h$ , di fiocco (jib) e randa (main), delle regolazioni 10, 13 e 21 rispettivamente dall'alto verso il basso.

CONCLUSIONI

SARA+IGNAZIO

Io metterei:

1. la CFD consente di capire il campo di moto a cui sono dovute le forze misurate in galleria
2. la modellazione dello strato limite è essenziale per cogliere la separazione
3. in particolare per trim prossimi al max CX dove larga parte del flusso è separata
4. per queste regolazioni non si possono utilizzare codici inviscidi che non separano
5. la cfd è purtroppo ancora fortemente dipendente dalla discretizzazione spaziale (più ancora del modello di turbolenza)
6. quindi all'esperienza dell'utente
7. la ricerca deve proseguire nella direzione di ricercare soluzioni mesh-indipendent

## 1. BIBLIOGRAFIA

F. Fossati, S. Muggiasca, I.M. Viola, A. Zasso (2006). *Wind Tunnel Techniques for Investigation and Optimization of Sailing Yachts Aerodynamics*; proceedings of 2nd High Performance Yacht Design Conference; Auckland, NZ.

Querard, A.B.G. and Wilson, P.A. (2007) *Aerodynamic of modern square head sails: a comparative study between wind-tunnel experiments and RANS simulations*. In, Modern Yacht, Southampton, UK, 11-12 Oct 2007. London, UK, The Royal Institution of Naval Architects, 8pp, 107-114.  
<http://eprints.soton.ac.uk/49314/>

I.M. Viola (2008). *Fluidodinamica Numerica e Sperimentale Applicata alla Dinamica della Imbarcazione a Vela*; Tesi di Dottorato di Ricerca; Politecnico di Milano, Italia.

S.J. Collie, M. Gerritsen, P. Jackson; *A Review of Turbulence Modelling for Use in Sail Flow Analysis*; School of Engineering Report No. 603; October 23, 2001; Auckland NZ